

# Soldagem de Materiais Dissimilares por Fricção e Métodos de Verificação da Qualidade da Junção

Lígia Maria de Freitas <sup>1</sup>, Eder Paduan Alves <sup>2</sup>, Sergio Luiz Mineiro <sup>3</sup>, Rafael Cardoso Toledo <sup>4</sup>

<sup>1</sup>Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, Brasil

Aluna de Mestrado do curso de Ciência e Tecnologia de Materiais e Sensores - CMS.

<sup>2</sup>Instituto de Aeronáutica e Espaço / Sistemas Espaciais - DCTA, São José dos Campos, SP, Brasil

<sup>3</sup>Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais / COPDT, São José dos Campos, SP, Brasil

<sup>4</sup>Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais / COPDT, São José dos Campos, SP, Brasil

ligia.0607@hotmail.com

---

**Resumo.** A soldagem de materiais dissimilares é de grande importância para a engenharia devido às aplicações estruturais nas áreas aeroespacial, aeronáutica, nuclear, bélica e automobilística. O processo de soldagem por fricção rotativa (SFR) ocorre no estado sólido, sem a fusão dos materiais envolvidos e tem como principal mecanismo de ligação a difusão atômica. Este trabalho tem como principal objetivo apresentar os resultados dos estudos realizados para verificação da qualidade de junções dissimilares de alumínio AA 6351-T6 e aço inoxidável AISI 304L. Foram utilizados ensaios mecânicos de tração para verificação da resistência mecânica das junções, inspeção por raios-x e ultrassom para verificação de defeitos na interface de ligação. Resultados das análises dos ensaios mecânicos mostraram diferentes valores de resistência mecânica em função das variações dos parâmetros de soldagem utilizados, possibilitando definir a qualidade das junções em função do valor de resistência mecânica máxima conhecida. Tanto as inspeções por raios-x quanto por ultrassom não possibilitaram análise qualitativa e tampouco quantitativa das não conformidades presentes na interface de ligação, necessitando de novos estudos para definições de padrões que possibilite análises por comparação.

---

**A Palavras-chave:** Soldagem; Fricção; Dissimilares; Ultrassom, Raios-X, Ensaios de Tração.

## 1. Introdução

A necessidade de utilização de uma grande variedade de materiais no setor aeroespacial (cerâmicas, metais, polímeros, compósitos, e suas combinações), torna imprescindível a presença de junções envolvendo diferentes combinações de materiais com características

físicas e químicas diferentes, denominadas junções dissimilares (Figura 1). Devido à sua complexidade, a soldagem de materiais dissimilares representa um grande desafio para a engenharia, pois requer a utilização de métodos de união cada vez mais tecnológicos, que atendam requisitos de projeto necessários para o perfeito desempenho do componente, subsistema ou sistema, garantindo o sucesso da missão a qual se destina. Na área aeroespacial, o uso de junções dissimilares possibilita a redução de massa e consequente redução de custos, tanto no desenvolvimento quanto na fabricação de componentes e sistemas complexos.



**Figura 1. Junções dissimilares. [Fonte: Sahoo (2007)]**

Neste trabalho foi utilizado o processo de soldagem por fricção rotativa convencional (SFR) que tem como princípio a conversão de energia mecânica em energia térmica, através da fricção entre superfícies de duas peças distintas. Neste caso, não ocorre aplicação de calor diretamente e toda energia térmica gerada pelo processo têm temperaturas abaixo do ponto de fusão do material das peças soldadas (ASM HANDBOOK,1993).

O principal mecanismo de ligação envolvido neste processo é a difusão atômica, que ocorre a temperaturas inferiores ao ponto de fusão dos materiais envolvidos no processo, mas suficiente para a formação de compostos intermetálicos.

As principais variáveis do processo de soldagem por fricção rotativa são os parâmetros de processo e os fatores relacionados aos materiais a serem soldados. Os parâmetros utilizados no processo de soldagem por fricção rotativa são:

**Velocidade de rotação (RPM):** Quando utilizadas altas velocidades, afetam diretamente a ZTA (Zona Termicamente Afetada) e pode ocorrer a formação de granulação grosseira na estrutura, reduzindo sua resistência à tração;

**Pressão de Fricção (P1):** É função da configuração da junta e materiais utilizados na solda, e deve ser suficientemente aplicada para que as superfícies mantenham contato, evitando a oxidação durante o aquecimento;

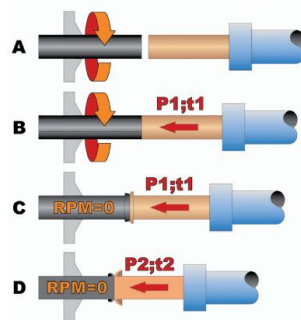
**Tempo de Fricção (t1):** É função da configuração da junta e materiais utilizados na solda. Em excesso resulta em desperdício de material, porém, em tempos muito baixos podem gerar pouco aquecimento, favorecendo o surgimento de óxidos na interface de solda;

**Pressão de Forjamento ( $P_2$ ):** Controlador da deformação dos materiais. Deve ser suficientemente forte para produzir uma solda com eficiência, mas não tão alta para causar uma deformação além do esperado. Neste ponto a pressão mais elevada pode melhorar as propriedades da junção;

**Tempo de Forjamento ( $t_2$ ):** Deve ser aplicado por um período suficiente para que a face dos materiais em contato tenha interações perfeitas ao longo do processo.

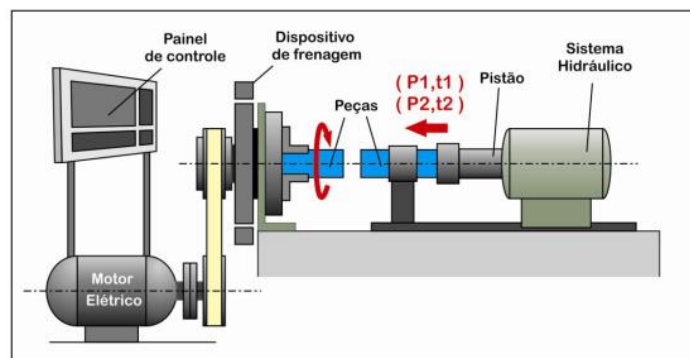
Com relação aos fatores relacionados aos materiais a serem soldados, os tipos dos materiais a serem soldados, a configuração das peças e as dimensões das peças são as variáveis que precisam de atenção.

A Figura 2 demonstra as etapas do processo de soldagem por fricção rotativa onde (A) é o período de aproximação; (B) aplicação de  $P_1, t_1$ ; (C) final da aplicação de  $P_1, t_1$  e parada do equipamento ( $RPM = 0$ ); (D) aplicação de  $P_2, t_2$  e término da soldagem.



**Figura 2. Etapas do processo de soldagem por fricção rotativa. [Fonte: ALVES et al. (2010)]**

A Figura 3 demonstra esquematicamente o equipamento de soldagem por fricção rotativa onde as peças a serem soldadas são alinhadas para que seja gerado atrito entre elas através da rotação e aplicação de forças de compressão entre as superfícies em contato, onde o calor gerado na interface de ligação é consequência da transformação de energia mecânica em energia térmica e envolve fricção abrasiva, dissipação de calor, deformação plástica e interdifusão atômica.



**Figura 3. Equipamento de soldagem por fricção rotativa. [Fonte: ALVES et al. (2012)]**

Para verificação da conformidade e resistência mecânica das junções soldadas pelo processo SFR, foram realizados ensaios mecânicos de tração, inspeção por ultrassom e por raios-X.

Este trabalho tem como principal objetivo apresentar os resultados dos estudos realizados para verificação da qualidade de junções dissimilares da liga de alumínio AA 6351-T6 e aço inoxidável AISI 304L, utilizando as técnicas de ensaios de tração, inspeção por raios-X e inspeção por ultrassom.

## 2. Metodologia

Os materiais utilizados para confecção dos pinos soldados foram a liga de alumínio AA6351-T6 e o aço Inoxidável AISI 304L. Ambos os materiais são utilizados para aplicações no setor aeronáutico e aeroespacial em função de apresentarem boa conformabilidade, excelente resistência mecânica, tenacidade e ótima resistência à corrosão. Junções dissimilares envolvendo estes dois materiais são obtidas por processos de soldagem no estado sólido, e são um grande desafio para a engenharia por serem materiais com grandes diferenças de propriedades físicas e químicas.

Foram analisadas 07 junções soldadas por SFR por meio de ensaios mecânicos de tração, inspeção por ultrassom e por Raios X. As amostras numeradas de 01 a 07 estão ilustradas na Figura 4, as quais foram disponibilizadas pelo Dr. Eder Paduan Alves. As junções foram produzidas fixando-se os parâmetros de pressão P1, tempos t1 e t2, com variação nos valores da pressão P2, também conhecida como pressão de forjamento.



**Figura 4. Corpos de prova soldados pelo processo de soldagem por fricção rotativa a serem analisados. [Fonte: Autor]**

Inicialmente foram realizadas inspeções por ultrassom e raios-x, depois foram confeccionados corpos de prova conforme norma ASTM E 8M e submetidos aos ensaios mecânicos de tração, com valor de resistência máxima a tração conhecida, o da liga de alumínio AA 6351-T6 (324 MPa).

O ultrassom foi realizado primeiramente com as amostras posicionadas com o material alumínio em contato com o transdutor. Na sequência, foi realizada a inspeção com as amostras posicionadas com o material aço inoxidável em contato com o transdutor.

O equipamento de Raios-X utilizado foi o GE micromex 180, conforme ilustrado na Figura 5.



**Figura 5. Equipamento de Raios-X [Fonte: Autor]**

O equipamento de inspeção de ultrassom utilizado foi o GE Modelo USN 60 com ranges de frequência de 0,25 - 25 MHz, conforme demonstrado na Figura 6.



**Figura 6. Equipamento de ultrassom utilizado [Fonte: Autor]**

Na Figura 7 pode ser visto equipamento utilizado para a realização dos ensaios mecânicos de tração



**Figura 7 – Máquina de ensaios de tração utilizada para os ensaios de tração, pertencente à Divisão de Química – Instituto de Aeronáutica e Espaço – DCTA [10].**

### **3. Resultados e Discussão**

Os resultados dos ensaios mecânicos de tração, inspeção por ultrassom e raios-x, que possibilitaram análise da eficiência do método empregado para verificação da qualidade das junções soldadas, são apresentados a seguir.

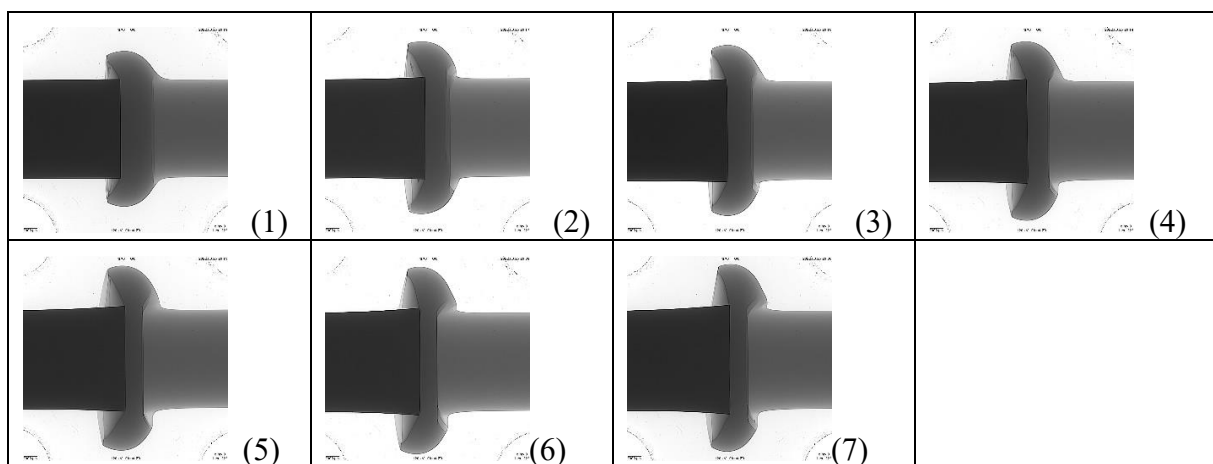
A soldagem foi realizada em equipamento de soldagem por fricção rotativa convencional, marca GATWICK com 3200 RPM, pressão P1= 300,0 Psi, tempo de fricção t1= 7s, com tempo de soldagem t2 = 4s e pressão P2 variável. A Tabela 1 demonstra os parâmetros de soldagem utilizados para cada amostra e os resultados dos ensaios mecânicos de tração.

**Tabela 1. Resultados dos ensaios mecânicos de tração**

N	P1	t1	P2	t2	Tensão $\sigma_t$ Máxima
	(Psi)	(s)	(Psi)	(s)	MPa
1	300	7	800	4	293
2	300	7	900	4	286
3	300	7	1000	4	298
4	300	7	1100	4	304
5	300	7	1200	4	325
6	300	7	1300	4	291
7	300	7	1400	4	284

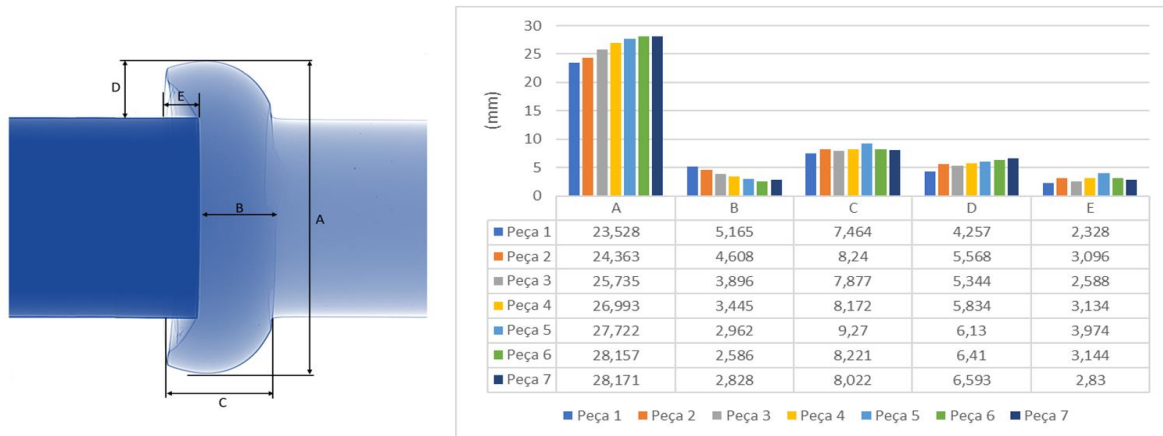
Os resultados dos ensaios mecânicos de tração demonstraram que quando a soldagem é realizada à pressão P2 de 1200Psi a junta adquire tensão máxima superior ao material base (alumínio = 324 MPa), confirmando a efetividade e qualidade da junta soldada.

A Figura 8 demonstra os resultados obtidos na inspeção por raios-x das amostras, onde o lado mais claro representa o material alumínio e o mais escuro o material aço inoxidável. Não foi possível identificar descontinuidades nas juntas soldadas, entretanto, as imagens geradas acabaram possibilitando a visualização da junção e de toda a geometria da rebarba, fundamental para o entendimento de todo o processo e realização de novos estudos. As amostras foram igualmente posicionadas e medidas as geometrias das rebarbas conforme ilustrado na Figura 9.



**Figura 8. Imagens da inspeção por raios-x [Fonte: Autor]**

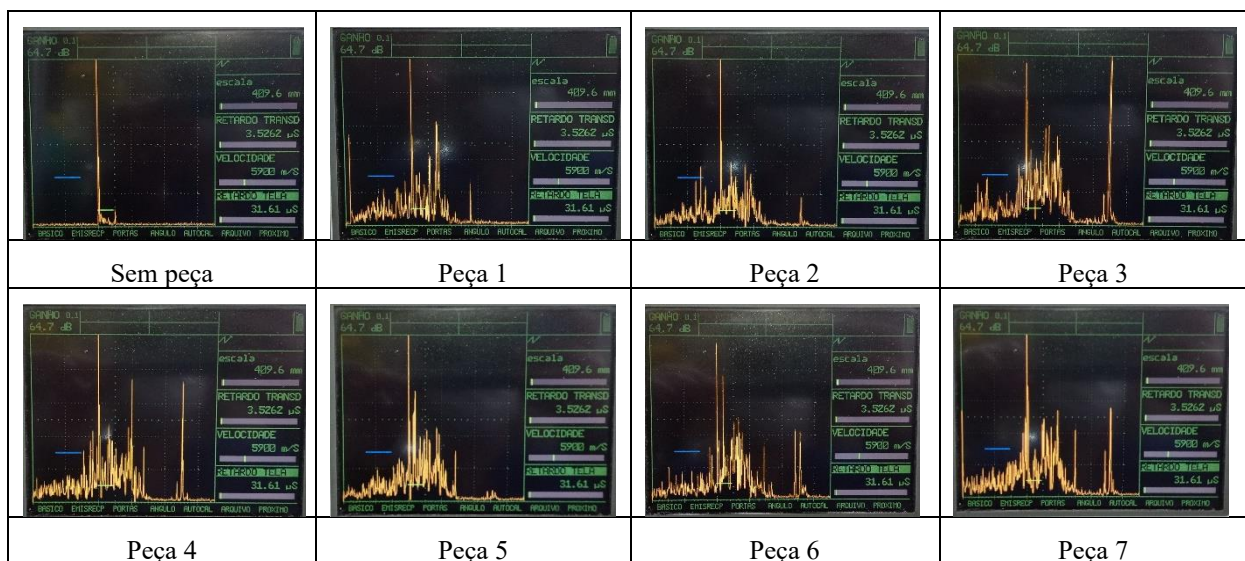




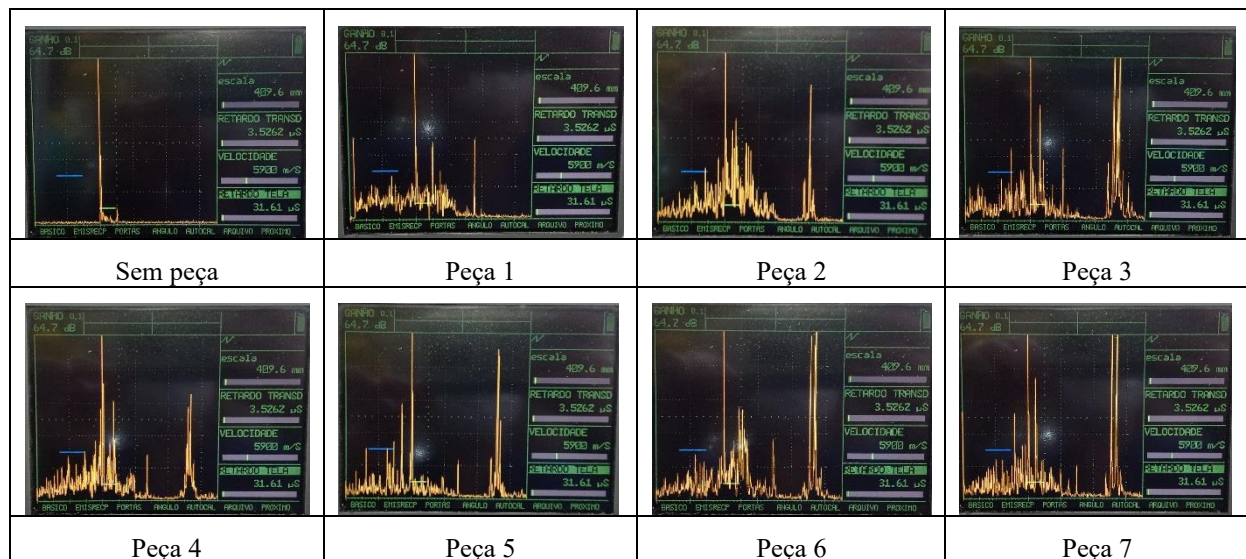
**Figura 9. Resultados da geometria das rebarbas por raios-x [Fonte: Autor]**

Os resultados demonstraram que com o aumento da pressão P2 de soldagem, a qual influencia diretamente na deformação do material, as dimensões A e D aumentaram gradativamente, enquanto a dimensão B teve comportamento oposto. As dimensões C e E não apresentaram comportamento constante, variando entre aumento e diminuição de tamanho.

A Figura 10 demonstra os resultados obtidos na inspeção por ultrassom das amostras posicionadas com o material alumínio em contato com o transdutor. Já a Figura 11 demonstra os resultados obtidos com as amostras posicionadas com o material aço inoxidável em contato com o transdutor.



**Figura 10. Ultrassom de amostras posicionadas com o material alumínio em contato com o transdutor [Fonte: Autor]**



**Figura 11. Ultrassom de amostras posicionadas com o material aço inoxidável em contato com o transdutor [Fonte: Autor]**

As imagens obtidas em ambas as situações, segundo as análises realizadas, demonstram similaridade, tanto para as amostras analisadas com o transdutor em contato com o alumínio, quanto em contato com o aço inoxidável.

Não foram identificadas diferenças significativas entre as amostras, o que torna a análise inconclusiva, sendo necessária realização de novos estudos para definições de padrões de qualidade utilizando-se de junções soldadas com defeitos conhecidos, e a análise ser realizada por comparação.

#### 4. Conclusão

Por se tratar de junções de materiais dissimilares que apresentam grandes diferenças de propriedades físicas e químicas, o melhor método para verificação da qualidade das junções soldadas por SFR, refere-se aos ensaios mecânicos de tração.

Tanto as inspeções por raios-x quanto por ultrassom não possibilitaram análises qualitativas e tampouco quantitativas das não conformidades presentes na interface de ligação, necessitando de novos estudos para definições de padrões que possibilitem análises por comparação.

A inspeção por raios-x, embora não tenha detectado não conformidades devido à complexidade das análises realizadas por serem junções bimetálicas, possibilitou a perfeita visualização das junções e das geometrias das rebarbas produzidas conforme os diferentes parâmetros utilizados, o que é de grande importância para o entendimento de todo o processo.

**Agradecimentos:** Agradeço ao Dr. Éder Paduan Alves pela confiança e parceria ao longo do desenvolvimento do trabalho, ao Técnico Glauber Oliveira por todo o empenho e competência para a realização das inspeções, ao Dr. Sérgio Luiz Mineiro pela oportunidade e por todo o suporte oferecido e ao Dr. Rafael Cardoso Toledo pelos conhecimentos



*compartilhados ao longo do desenvolvimento do trabalho. Ao INPE, agradeço a oportunidade de poder fazer parte desta renomada instituição.*

## Referências

- ALVES, E. P., Junções de materiais dissimilares utilizando o processo de soldagem por fricção rotativa. 126 p. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Ciência e Tecnologia de Materiais e Sensores) - INPE, São José dos Campos/SP, 2010.
- ALVES E.P. et al., Welding of AA1050 aluminum with AISI 304 stainless steel by rotary friction welding process. J. Aerosp. Technol. Manag., São José dos Campos, v.2, No 3, pp. 301-306, Sep-Dec.,2010.
- ALVES E.P. et al., Experimental Determination of Temperature During Rotary Friction Welding of AA1050 Aluminum with AISI 304 Stainless Steel. J. Aerosp. Technol. Manag., São José dos Campos, v.4, No 1, pp. 61-67, Jan - Mar., 2012.
- ALVES, E. P., Caracterização Mecânica e Estudo do Perfil Térmico na Soldagem por Fricção Rotativa de Materiais Dissimilares. 2016. 182 f. Tese (Doutorado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia e Tecnologia Espaciais / Ciência e Tecnologia de Materiais e Sensores, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2016.
- ALVES E.P. et al., Experimental Thermal Analysis in Rotary Friction Welding of Dissimilar Materials. J. Aerosp. Technol. Manag., São José dos Campos, v.11, e4019, 2019.
- AMERICAN WELDING SOCIETY, Welding Handbook. 9ed. Miami: AWS, 2001
- ASM HANDBOOK, vol. 6, Welding, Brazing and Soldering. ASM, International 1993.
- BREPOHL, Danielle Cristina de Campos Silva. Caracterização das Camadas Formadas no Processo de Galvanização à Quente Sobre Uma Chapa de Aço Livre de Intersticiais. 2013. 90 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Ppgem, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2013.
- CALLISTER, W. D., Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução. 9ed. John Wiley & Sons, Inc., 2016.
- MESSLER, R. W. Joining of Materials and Structures. ed. Elsevier. Butterworth Heineman, USA, 2004.
- MIKELL P. G. Introdução aos Processos de Fabricação. 1 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.
- MODENESI, P. J.; MARQUES, P. V.; BRACARENSE, A. Q. Soldagem: fundamentos e tecnologia. 3. ed. Belo Horizonte/MG: Editora UFMG, 2005. 363 p.
- OKUMURA, T. & Taniguchi, C. Engenharia de Soldagem e Aplicações, Ed. LTC, 1982.
- SAHOO, R. Study of friction welding. 2007. Thesis (Bachelor of Technology in Mechanical Engineering) - National Institute of Technology, Rourkela/India, 2007.
- SMITH, D. Welding: Skills and Technology. Singapore: McGraw-Hill Book Co., 1986. 654 p.
- SOUZA, S. Ensaios Mecânicos de Materiais Metálicos: Fundamentos teóricos e práticos. 5. ed. São Paulo: Blucher, 1982. 304 p.
- ULTRASSOM INDUSTRIAL: O END MAIS UTILIZADO. Disponível em: <https://inspesolda.com/ultrassom-industrial/>. Acesso: 19 ago, 2022.
- WAINER, E.; BRANDI, S. D.; MELO, V. D. O. Soldagem: processos e metalurgia. 2º Reimpressão. São Paulo: Edgard Blucher, 2000. 504 p.